

터널 구조물의 내화 기술

Fireproof Techniques for Tunnel Structures



박해균*
Hae-Geun Park



전상은*
Sang-Eun Jeon



이명섭**
Myeong-Sub Lee

본 번역기사는 일본콘크리트공학협회(JCI)에서 발간한 「콘크리트 공학」 지에 게재된 기술기사(2004. 8)를 번역한 것으로, 2003년 삼성물산(주)과 Nippon Civic Consultant가 공동으로 연구 수행한 쉐드터널 콘크리트 라이닝의 내화 실험성과의 일부가 함께 포함되어 있다.

1. 머리글

최근 자동차에 의한 물류교통의 증가에 따라 국내외에서 많은 터널 화재사고가 보고되고 있다. 토목 구조물 중에서도 지중에 시공되는 터널 구조물은 이용공간이 폐쇄되어 있으므로 소화(消化)활동이 곤란하고, 화재사고 피해는 커지기 쉬우며, 화재 후의 보수·복구 또한 곤란한 실정이다. 특히, 2차 라이닝을 생략한 Shield 터널이나 수중에 시공되는 침매(沈埋)터널 등은 그 보수에 막대한 비용과 시간을 요한다. 또한, 복구기간 동안 차단되는 교통편의 등의 손실까지 고려한다면 경제적 손실은 상당히 크다고 할 수 있다. 도로터널 구조물의 내화는 ① 사용자 및 소화활동 종사자의 안전 확보 ② 터널 시설물의 보전 ③ 고가의 인프라 구조물의 보존과 조기 기능회복 ④ 터널의 과도한 변형·붕괴에 의한 2차 재해의 방지 등을 목적으로 한다. 본 보고서는 최근 많은 연구·개발 및 실적이 있는 도로 Shield 터널과 침매터널의 내화기술의 현황을 소개한다.

2. 터널화재의 규모

터널 내에서 발생하는 화재의 규모를 예상하는 것은 상당히 어렵다. 이는 1999년 3월에 발생한 몽블랑 터널의 화재사고(적재한 마가린과 소맥분의 연소가 원인으로 화재 최고온도가

1,000 ~ 1,300°C에 이르렀다)나 1995년 5월에 발생한 Tauern 터널의 화재사고(도로를 적재한 트럭의 충돌사고)에서 볼 수 있는 것과 같이 대규모 화재의 가연물은 가솔린 등의 위험물에 국한되지 않기 때문이다. 일본의 터널교통관제의 현재 상황을 보면 터널 내를 통과하는 일반차량의 종류와 대수의 파악은 가능하나, 차량에 적재하고 있는 가연물의 종류나 그 양까지 특정 하는 것이 곤란한 상황에 있다. 선진 외국에서는 <표 1>에 나타내는 것과 같이 일본과 같은 식의 법률이나 조례 등으로 위험물을 규정하고 위험물 적재 차량의 터널 내 통행을 규제하고 있는 경우가 많다.

반대로 터널에 따라 위험물 적재차량의 통행을 제한하는 것이 상당한 경제적 손실을 초래하는 경우에는 에스코트를 붙여 통행하게 하거나 야간에만 통행하도록 하는 등의 제한적 통행, 혹은 터널 종류에 따라 무제한 통행을 허가하고 있는 경우도 있다. 구미 지역에서는 EU 통합을 통한 공동연구를 실시하여 터널내 화에 대한 개념을 2006년에 통일하려고 하고 있다. 일본에 사용 중인 수중 또는 이에 인접된 터널은 위험물 적재차량의 통행을 금지하고 있는 경우가 많으나, 항만지역의 터널에서는 물류 통행을 위한 제한적 허가를 하는 사례도 볼 수 있다.

표 1. 위험물 적재차량의 취급

국가 명	위험물 적재차량의 규제내용
네덜란드	도로터널에서는 운송을 허가하고 있는 위험물을 3개로 구분 - 개착터널은 규제가 없고 모든 위험물 적재차량의 통행 가능 - 카테고리 I : 1기압 이상에서 기폭하는 폭발물의 운송을 금지 - 카테고리 II : 위험도가 비교적 낮은 물질만 허가
독일	RABT(도로터널 내의 시설과 교통에 관한 규제)로 국내의 모든 도로터널에 대해 위험물 운송에 관해 규제 있음
프랑스	국도터널은 원칙적으로 위험물 운송을 금지 국도터널 이외에는 위험물의 운송을 허가
영국	모든 도로터널을 대상으로 한 규제가 없고 터널별로 규제 있음
미국	주별 법령으로 1터널의 위험물의 운송에 관한 규제 있음 군이나 지자체의 조례에 규제 있음
일본	도로법에서 5,000 m 이상의 장대터널 또는 수중, 물가 터널에 대해 위험물의 운송을 금지 또는 제한할 수 있다.

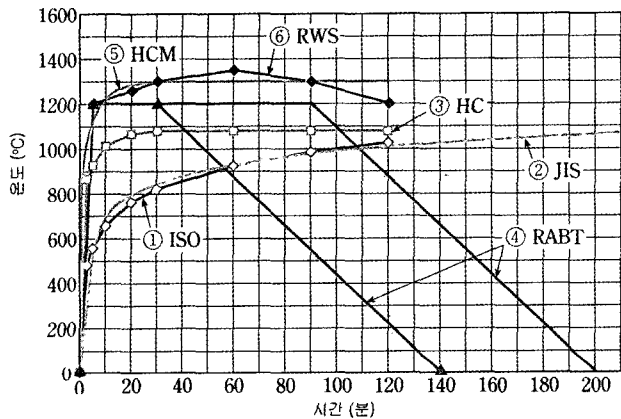
* 정희원, 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장
hgpark68@samsung.com

** 정희원, 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장

화재규모의 설정은 해당 터널에 관해 다음의 1) ~ 5)의 사항을 종합적으로 고려하여 적절하게 설정할 필요가 있다. 또, 여러 나라에서는 여러 가지 이유를 우선하여 수중 또는 인접한 터널의 경우는 반드시 내화공법을 설치하는 개념도 있다.

- 1) 도로계획(도로제원이나 도로의 구분, 터널연장이나 도로선형, 교통량, 주변 환경)
- 2) 설치환경(수중이나 연약지반 아래 등)
- 3) 이용형태(위험물 적재차량의 통행가능/제한적으로 통행가능/통행금지/소형차 전용도로 등)
- 4) 방재등급이나 방재설비, 소화활동까지의 대응시간
- 5) 구조형식이나 구조특성 등

여러 외국에서 사용되고 있는 화재온도-시간곡선을 <그림 1>에, 교통 종류별 화재온도-시간곡선과의 관계를 <표 2>에 나타낸다.



- ① ISO : ISO의 표준시간-온도곡선, PIARC에서는 소형차 전용도로 등에 적용
- ② JIS : JIS A 1304-1994 건축구조부분의 내화시험방법 4, 가연등급에 관한 표준곡선을 설정
- ③ HC : 탄화수소 연소곡선(Hydrocarbon curve), 기름 등에 의한 화재를 가정한 곡선, 일본 및 여러 외국에서 사용되고 있다.
- ④ RABT : 독일의 도로터널의 설비 및 운용에 관한 지침, 1994.
- ⑤ HCM : 수정 탄화수소 연소곡선, 프랑스 등에서 사용되고 있다.
- ⑥ RWS : 네덜란드 운송 공공사업성 치수본국의 곡선

그림 1. 외국에서 내화설계에 사용하고 있는 화재온도-시간곡선

표 2. 교통 종류별 화재온도-시간곡선

교통종별(화재시의 발열량)	화재폭로시간(분)	온도시간곡선
보행자	-	고려하지 않는다
자전거	2	고려하지 않는다
수레차	90 ~ 120	HC
자동차(S-10MW)	30 ~ 60	ISO 또는 HC
컨테이너 셔틀	120 이상	HC
트럭(100MW)	120 이상	HC 또는 RABT
탱크롤러(300MW)	120	RWS 등
	240	ISO 또는 HC
버스	90 ~ 120	HC
지하철, 도면전차, HSL(40MW)	120	HC
열차	120	RWS 등
	240	ISO 또는 HC

터널화재의 화재온도-시간곡선의 특징을 다음 ① ~ ⑦에 나타낸다.

① 화재발생에서 약 5분 정도에서 최고온도 근처까지 급격히 상승한다. ② 화재의 지속시간은 120분 정도를 기준으로 한다. ③ RABT는 가구를 만재한 트레일러를 가정한 화재실험 결과로 최고온도 1,200°C의 곡선을 설정하고 있다. ④ RWS는 45kl의 가솔린에 의한 300 MW의 열출력을 상정하여 터널화재 모형실험을 실시하여, 최고온도 1,350°C를 설정하였다. ⑤ JIS (또는 ISO)는 일본의 건축분야의 내화설계에 사용되고 있는 화재온도-시간곡선이지만, 프랑스에서는 승용차(소형차 전용도로)화재를 대상으로 한 경우에는 ISO를 사용하고 있다. 또, 대형트럭을 대상으로 한 경우에는 ISO의 화재 지속시간을 240분으로 하여 옥외에서 위험물을 적재하지 않은 모든 대형트럭 화재를 커버하고 있다. 또, 옥외에서 위험물을 적재하고 있는 대형 트럭화재에 관해서도 90%를 커버하고 있다. ⑥ HCM은 HC의 최고온도 1,080°C를 1,280°C로 수정한 것이다. ⑦ 서냉(徐冷)에 이른 시점 혹은 소정의 화재 지속시간이 종료한 시점에서도 라이닝 콘크리트 온도는 내려가지 않는다. 더욱이 시간지연으로 상승하는 경우도 있다. 그 때문에 내화공의 확인시험시간은 라이닝 콘크리트 자체의 온도가 떨어질 때까지의 시간을 대상으로 하여 실시해야 한다.

일본에서는 위의 1) ~ 5)의 터널의 경우와 함께 다음 6) ~ 7)에 나타내는 이유 등으로 RABT 또는 HC를 선정하고 있는 사례가 많다.

- 6) RWS는 45kl의 가솔린에 의한 300 MW의 총 열출력을 가정하고 있고, 일본의 탱크로리의 최대 적재규모는 26kl로, 이 총열출력은 대형 트럭이나 버스와 동등하고 HC나 RABT에 상당한다.
- 7) RABT의 화재지속시간이 60분의 경우의 총열출력은 HC와 거의 동등하다.

3. 내화설계

내화설계는 해당 터널의 상황이나 구조특성에 따라 내화공 필요의 여부를 판단한 후에 화재규모를 설정하고, 내화성능을 만족하는 내화공을 배치하는 순서로 한다. 내화공의 성능은 내화실험 등으로 조사한다. <사진 1>에 세그먼트 내화실험의 예를 나타내고, <사진 2>에 화재사고에 관한 폭발 예를 나타낸다.

폭발현상은 온도상승구배 및 콘크리트의 압축응력, 물-결합재비, 사용골재, 혼화재 등의 영향을 받는다. 지금까지 연구에서는 압축응력 13 MPa, 물-결합재비 31.9%, 고로슬래그 210 kg/m³의 공시체에 RABT 화재를 작용시킨 경우의 폭발 발생 온도는 <그림 2>에 나타내는 것과 같이 온도상승구배 9.8°C/



사진 1. 세그먼트 내화실험과 폭렬상황 (TNO)



사진 2. 실 터널화재에 의한 세그먼트의 폭렬상황 (출처: Promat사 카달로그)

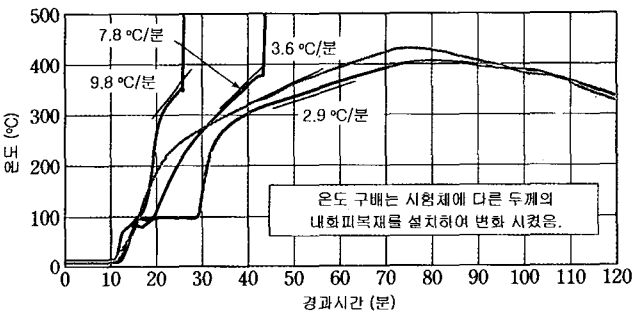


그림 2. 온도상승구배와 세그먼트의 폭렬온도

분에서는 350°C, 7.8°C/분에서는 375°C로 폭렬이 발생하였으며 이 이하의 온도상승구배에서는 폭렬이 발생하지 않았다. 폭렬 발생온도는 이와 같은 여러 조건에 따라 다르므로 현재 상황에서는 실험에 따른 확인이 필요하다. 폭렬의 발생을 억제하는 방법으로서 <표 3>에 나타내는 3종류의 방법을 들 수 있다.

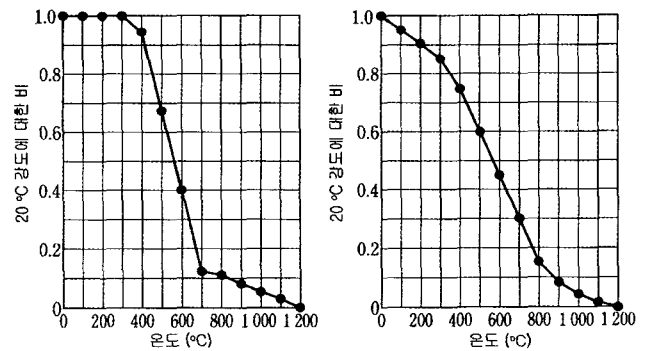
내화성능은 ① 터널 콘크리트 라이닝의 구조체로서의 안전성 ② 사용성(안전한 교통운용 확보를 위한 환경의 확보) ③ 지수(止水)성(사용성 확보 및 라이닝의 열화방지, 유지관리비의 저감) 등을 들 수 있다. 내화공의 요소성능은 <표 4>에 나타내는 사항을 들 수 있다. 여기서 내화공의 설계는 터널의 구조부재를 구성하는 각 재료별로 내화온도를 설정한다(그림 3). 즉, 모든 사양 규정형의 설계가 주로 사용되며 그 사례를 <표 5>에 나타낸다.

표 3. 세그먼트의 폭렬을 억제하는 대책

폭렬의 발생을 억제하는 원리	대책방법
① 콘크리트 표면을 폭렬 한계온도 이하로 조절하고, 온도상승구배를 작게 한다.	내화피복의 설치 내화도료의 도포
② 폭렬의 원인의 하나로 알려진 콘크리트 내의 수분의 수증기압의 상승을 낮춘다.	유기섬유(예를 들어, PP)의 첨가 구조물의 강제건조
③ 구조물의 내력을 확보하기 위해, 다소의 폭렬은 허용해도 깊은 곳까지의 진전을 억제한다.	메쉬의 배치 철근 간격의 조밀화

표 4. 내화공(피복재 및 부착금속류)의 요소성능

분류	요소성능
화재시의 요소성능	콘크리트 라이닝의 내력에 영향을 미치는 폭렬을 발생시키지 않을 것(매립부재의 영향도 고려)
	라이닝을 구성하는 강재가 내력에 영향을 미치는 강도저하를 발생시키지 않을 것
	라이닝 구조의 기능상 지장이 되는 변형, 손상 등이 발생하지 않을 것
	내화피복재 및 부착재가 낙하하거나 박락을 일으키지 않을 것
진화 후의 요소성능	연결부나 부착부재는 일부분과 동등 이상의 내화성능을 가질 것
	인체에 유해한 연기, 가스 등을 발생시키지 않을 것
	라이닝 구조에 장기적인 내력이 잔존하고 있을 것
상시의 요소성능	손상된 내화피복재의 교체가 용이할 것
	차량 충돌이나 비석 등에 의해 제2차 피해를 미치게 하는 손상이 없을 것
	터널 내의 풍압이나 진동에 의해 내화공이 손상, 박락, 낙하하지 않을 것
	터널 내의 온도, 누수, 배기가스 등에 의해 열화하여 기능을 잃지 않을 것
	세척, 점검 등의 유지관리가 용이 할 것



a. 강재강도의 온도 의존성 b. 콘크리트 강도의 온도 의존성

그림 3. 콘크리트 부재의 온도 의존성

콘크리트는 250 ~ 350°C부터 콘크리트를 구성하고 있는 수화 생성성분이 탈수하기 시작하여 400 ~ 700°C에서 칼슘실리케이트 수화생성물의 보유수분의 대부분을 잃는다. 또, 400°C를 넘는 부근에서 Ca(OH)₂가 탈수되어 CaO가 되며, 800°C 부근에서 CaCO₃이 CaO와 CO₂로 분리된다. 이와 같은 탈수나 열분해에 의해 수축을 받은 콘크리트에는 다수의 마이크로

표 5. 내화공의 사양규정 예

항목	사양 규정의 예
화재규모	이전의 화재온도시간곡선을 사용한다.
조사방법(내화공의 내구성 등은 별도 조사한다)	아래의 사양을 토대로 실험 또는 수치해석으로 조사한다.
	[라이닝 구성부재의 한계온도] - 콘크리트 : 250 ~ 380°C(폭렬하지 않을 것) - 강재 : 250 ~ 350°C - 고무재 : 70 ~ 100°C
	[내화공의 요소성능] - 부착금속을 포함한 내화공은 낙하하지 않을 것

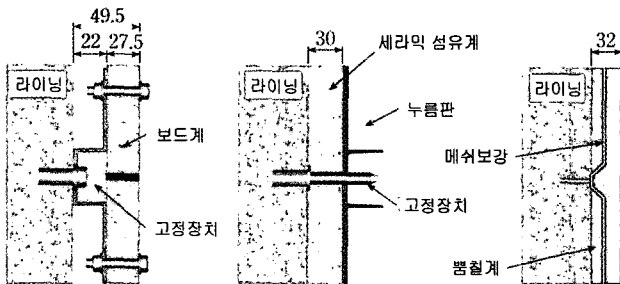


그림 4. 실험으로 채용된 내화공의 설치방법 예

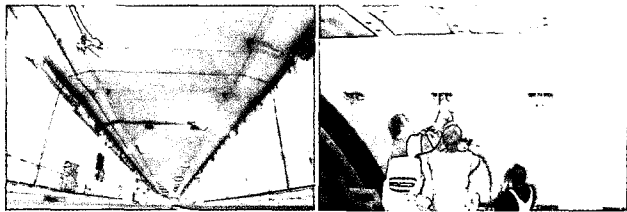


사진 3. 보드계의 시공사례 (동경만 임해도로/침매터널)

사진 4. 보드계의 시공사례 (독일 제4 ELB 쉴드터널)

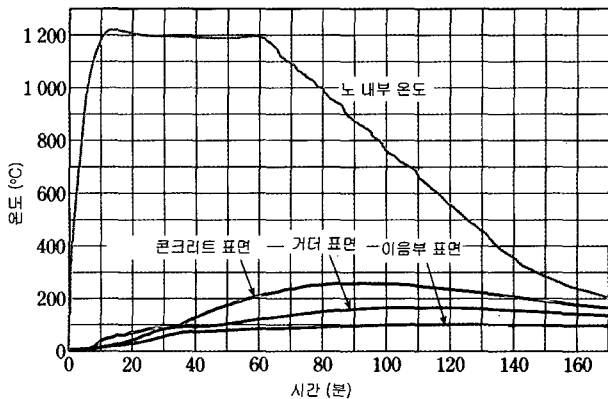


그림 5. 내화시험시의 시간온도곡선 예

균열이 발생하고, 냉각 후의 CaO의 흡수에 의한 이상팽창이나 장기적으로 파괴현상으로 이어진다. 일반적으로는 냉각 후에 콘크리트 안의 시멘트분이 재 수화 하여 압축강도가 회복한다고 알려져 있다. <표 5>에서는 위의 영향을 고려하여 콘크리트의 허용 내화온도의 상한치를 250 ~ 380°C로 하고 있다.

RC구조에 사용되는 철근은 고온 하에서 항복점 강도나 탄성계수 등의 기계적 성질이 현저하게 저하한다. 기계적 성질의 저하는 규격이나 구조방법에 따라 다르다. 수열온도가 약 200°C에서 항복점 강도가 저하하기 시작하여 400 ~ 600°C에서 상온의 항복강도의 반 정도가 된다. 600°C 정도까지는 냉각 후에 그 특성이 회복하는 것으로 알려져 있다. 이상으로 강재의 허용내화온도의 상한치를 250 ~ 350°C로 하고 있다. 고무재 등의 고분자 재료의 내열성으로 허용내화온도 상한치를 70 ~ 100°C로 하고 있다.

이에 대해 1999년도 개정 건축기준법에서는 성능조사형의 검증방법이 도입되었다. 건축기준법에서 규정된 검증방법으로 내화 성능을 검증하는 방법과 고도의 전문적 지식에 따라 성능을 검증하고, 성능평가기관이 평가하는 방법이다. 한편, 터널 분야에서는 터널의 특성이나 예상되는 화재규모에 맞는 열유체 해석을 실시하고 화재온도-시간곡선을 선정하는 방법도 제안되고 있다.

4. 내화공의 종류

내화공에는 (1) 단열성이 있는 피복재로 라이닝을 하는 것으로 연소물의 열전도를 억제하는 방법과 (2) 콘크리트 라이닝 자체에 내화성능을 부여하는 경우가 있다. 아래에 이 두 가지 사례를 나타낸다.

(1) 내화피복재

내화피복재는 시공실적 등으로 ① 보드계 및 ② 세라믹 화이버계 ③ 스프레이계 방법 3종류로 크게 나눌 수 있다.

① 보드계

국내의 모두 가장 실적이 있는 공법이다. 규산칼슘이나 세라믹 등을 주 재료로 한 판 모양으로 라이닝 표면에 밀착되는 바로 붙이기, 공기층을 만드는 띄어 붙이기(사진 3), 콘크리트 타설시에 미리 거푸집 안쪽에 붙여 탈형하면 벽면자체가 내화공이 되는 등의 설치방법이 있다. 보드는 평면판과 Shield터널 내부를 따라 붙이기가 가능한 곡면 가공품이 있다.(사진 4)

보드간의 연결부는 2층 구조로 하여 관통 연결부가 되지 않는 처리를 하는 경우가 많다. 제품에 따라서는 중량이 있으므로 라이닝의 부착에 대해서는 자동차 진동이나 풍압 등에 따라 낙하나 균열이 발생하지 않도록 고정방법이나 고정간격을 연구할 필요가 있다. <그림 5>는 세그먼트 내면에 보드계의 내화공을 설치하고, 화재온도-시간곡선으로 RABT(화로 내 온도)를 작용시킨 경우의 내화시험 예이다. 세그먼트의 콘크리트 표면 온도는 300°C 이내로 관리되어 폭렬현상이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

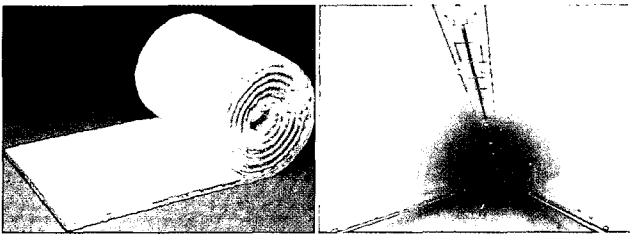


사진 5. 세라믹화이버계 내화재의 예

사진 6. 슛크리트계의 시공사례 (네덜란드 · 웨스터헬드터널)



그림 6. 폭렬을 방지하는 메커니즘과 PP 섬유

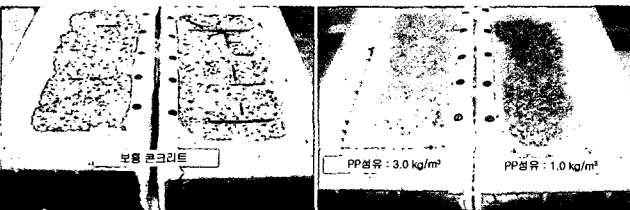


사진 7. 보통 콘크리트의 폭렬상황

사진 8. 섬유(fiber)에 의한 폭렬 방지 효과

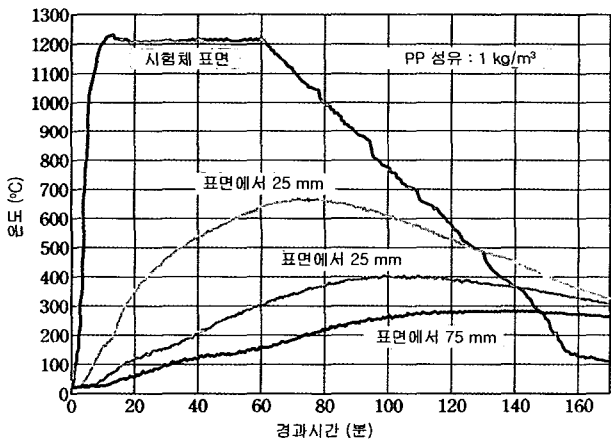


그림 7. RABT 곡선 하의 PP섬유의 효과 예

② 세라믹 화이버계

경량으로 내열성이 뛰어난 실리카계의 세라믹화이버를 주 재료로 하는 모포형태(사진 5)의 내화재로 설치방법은 보드계의 뒤의 틈이나 대상물을 포장하여 금속재로 고정하거나 한다. 경량이고 유연성이 있으므로 이음부 등에 적용된다. 세라믹섬유는 발암성 등으로 인체에 유해성이 지적되는 제품이기도 하나, 최근에는 체내에 축적되지 않는 생체 용해성 섬유인 제품도 개발되고 있다.

③ 스프레이계

내열성이 뛰어난 버미큘라이트(vermiculite)가 함유된 모르타르계의 재료를 라이닝에 도포하는 공법이다(사진 6). 낙하방지를 위해 와이어 메쉬로 보강을 병용하는 경우도 많다. 대상물의 형상에 좌우되지 않으므로 다른 공법과 비교하여 시공속도가 빠른 장점이 있다. 표면의 평활성은 보드계에 비교하여 떨어지지만 물러마감이나 흠손마감을 병용하여 개선할 수 있다.

(2) 수지섬유 혼입

콘크리트에 수지섬유(PP: 폴리프로필렌섬유)를 혼입하여 폭렬에 대한 저항성을 높이는 방법으로, 화재피해 작용층의 철근을 덮은 콘크리트 자체를 내화피복 기능하도록 하는 공법이다. 폭렬현상의 메커니즘에는 여러 주장이 있으나 <그림 6>에 나타내는 것과 같이 PP섬유가 160°C 전후의 화재피해의 열에 의해 용해되고 폭렬의 요인이 되는 콘크리트 내부의 수증기압을 감소시키는 것이다. 이전의 실험연구에서는 보통(plain) 콘크리트로 <사진 7>에 나타내는 것과 같이 극심한 폭렬현상이 발생하고 있는 경우에도 1m³ 당 1kg 정도의 PP를 첨가한 공시체는 사진-8에 나타내는 것과 같이 경미한 손상을 보였다.

<그림 7>에서 보면, 예를 들어 철근의 온도를 350°C 로 억제하기 위해서는 PP를 첨가한 덮는 콘크리트 타설량은 60mm 정도가 필요하다고 할 수 있다. 이 방법을 적용할 경우에는 콘크리트의 표면억제온도나 열열화 특성, 덮을 콘크리트의 보수 필요성 등 종합적으로 고려할 필요가 있다. 또, 콘크리트 세그먼트의 경우는 이음부의 금속이나 실링재료 등에 관해 별도의 내화공의 필요성의 유무를 검토해야한다.

5. 맺음말

일본에서 터널 내화 연구나 실험이 본격적으로 시작된 것은 최근이다. 그전까지는 콘크리트는 불연재로 콘크리트 구조물 자체가 내화구조라고 생각해 왔다. 그러나 유럽의 터널화재사고의 사례 및 화재실험으로 철근콘크리트 라이닝에 큰 피해가 발생하는 것이 판명되었다. 그 때문에 유럽, 특히 독일, 네덜란드에서는 터널화재 및 터널라이닝에 미치는 영향, 피해에 관해 다수의 실험 연구를 실시하고 내화설계 시공기술에 대해 검토를 진행해 왔다. 일본에서도 이들 효과를 고려함과 동시에 Shield 터널 및 침매터널을 대상으로 한 내화공의 실험연구가 실시되어 실용적인 내화기술이 완성되어가고 있다. 합리적인 내화설계를 실시하기 위해서는 손상메커니즘, 열유체해석, 열전도해석 및 고온하의 서냉(徐冷) 시의 부재의 역학적 거동(변형, 내력) 등에 관해 종합적으로 연구하고 구조물의 특성에 대응한 내화기술을 확립할 필요가 있다. □